

加圧流動床石炭灰を混入したPC桁の実用化実験

プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 ○ 溝垣 道男
 広島大学 大学院工学研究科 正会員 佐藤 良一
 国土交通省 中国地方整備局 田中 雅次
 中国電力(株) 技術研究センター 中下 明文

1. はじめに

加圧流動床方式の石炭火力発電所から発生する石炭灰(以下「PFBC灰」という)は、中国地方で年間10万トンを越す排出量があり、産業廃棄物として取り扱いされているため再資源化への技術開発が地域社会から強く要請されている。

PFBC灰の性質は、表-1,2に示す通り、フライアッシュに比べCaOとSO₃を多く含有し、自硬性があり膨張性水和物の生成が特徴的で、コンクリートに混和した場合、自己収縮が小さく高い長期強度が期待される。また、PFBC灰混入による初期強度の低下は高温養生を行うことにより改善できることが基礎研究により明らかになっている。本文では上記の特性に着目し、初期に高温養生を行うプレテンション方式のPC桁への適用性について検討するため、通常のコンクリートによるものと、PFBC灰を混入したコンクリートによるPC桁の製作を行い、性能比較を行った中から、プレストレスの定着長、曲げ載荷実験について結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験に使用した材料を以下に示す。

セメント：早強ポルトランドセメント 比重 3.14

細骨材：混合砂 比重 2.61, 粗粒率 2.7

粗骨材：碎石 最大寸法 20mm

比重 2.69, 粗粒率 6.7

PFBC灰：中国電力(株)大崎発電所1号機

原粉;ワンボ炭 比重 2.61

混和剤：高性能減水剤(ポリカルボノ酸系) 比重 1.07

AE剤 比重 1.03

表-1 物理的性質

| 種類 | 比表面積 (cm ² /g) | 密度 (g/cm ³) | 強熱減量 (%) | 湿分 (%) | フロー値比 (%) | MB吸着量 (mg/g) |
|---------|---------------------------|-------------------------|----------|--------|-----------|--------------|
| 早強セメント | 4570 | 3.14 | 1.03 | - | - | - |
| PFBC灰 | 4580 | 2.61 | 5.90 | 0.10 | 84 | 0.42 |
| フライアッシュ | 4110 | 2.22 | 0.8 | - | - | 0.59 |

表-2 鉱物組成

| 種類 | SiO ₂ (%) | Al ₂ O ₃ (%) | Fe ₂ O ₃ (%) | CaO (%) | MgO (%) | SO ₃ (%) | Na ₂ O (%) | K ₂ O (%) |
|---------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------|---------|---------------------|-----------------------|----------------------|
| 早強セメント | 20.82 | 4.85 | 2.56 | 65.27 | 1.21 | 2.90 | 0.22 | 0.35 |
| PFBC灰 | 42.40 | 12.60 | 3.96 | 24.10 | 1.21 | 5.71 | 0.49 | 0.68 |
| フライアッシュ | 73.80 | 16.80 | 4.60 | 0.50 | 0.50 | 0.10 | 0.60 | 0.60 |

2.2 配合

図-1に、事前に検討した通常のPC桁のコンクリートとPFBC灰混入コンクリートの材齢と圧縮強度の関係を示す。PFBC灰混入コンクリートの配合は、セメントの30%をPFBC灰に置換え、通常のPC桁(f'ck=50N/mm²)の水結合材比と同様のW/B=35.5%とし、試験練りを実施した。その結果は初期材齢時の強度が通常の場合より10N/mm²程度小さかった。

そこで、プレストレス導入時の強度は、ばらつきを考慮して推奨値(35N/mm²)の1.2倍を満足し、かつ通常のコンクリートと同程度となるよう試験練りを行い、水結合材比 W/B=32%を決定した。PFBC灰は、比表

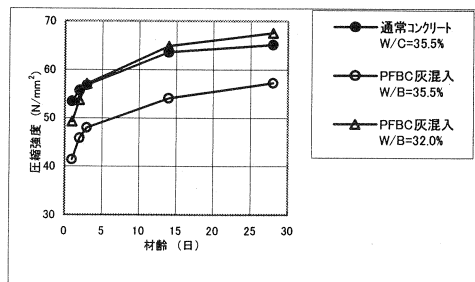


図-1 材齢と圧縮強度の関係

面積が大きく、混入率が増すごとに粘性が高くなる物理的性質を持っているため、強度、フレッシュコンクリートの性状および作業性を条件として、単位水量と細骨材率を表-3の配合に決定した。なお、養生方法は50℃で5時間の蒸気養生を行った。

図-1に示すように、PFBC灰混入コンクリートの圧縮強度は、プレストレス導入時の材齢1日における所要の強度を満足すると共に、材齢28日の強度が通常コンクリートの強度を上回った。

表-3 コンクリートの配合

| | 水結合材比 W/B (%) | 細骨材率 s/a (%) | PFBC灰 置換率 (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | 混和剤添加 量(B×%) | |
|---------------|---------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|-----------|-------|----------|----------|-----------------|------|
| | | | | 水 W | セメント C | PFBC灰 | 細骨材 S | 粗骨材 G | 減水剤 | AE剤 |
| 通常コンクリート(早強) | 35.5 | 40.0 | 0 | 151 | 425 | 0 | 698 | 1079 | 0.65 | 0.02 |
| PFBC灰混入コンクリート | 32.0 | 42.0 | 30 | 160 | 350 | 150 | 686 | 977 | 0.95 | 0.04 |

2.3 試験供試体

PC桁の定着長さ確認試験および曲げ試験は以下の供試体を用いて行った。

製作主桁；プレテンション方式スラブ桁

(JIS A 5373 AS-16)

桁長；L=16.600m

桁高；H=600mm

各供試体における試験概要図を図-3、4に示す。

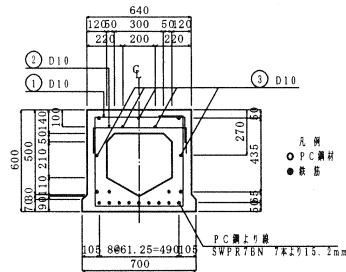


図-2 供試体標準断面図

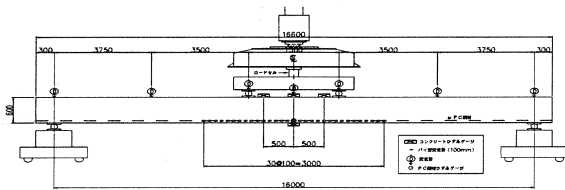


図-3 静的曲げ載荷試験装置

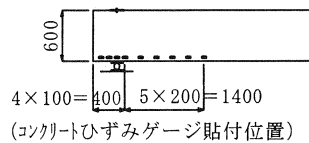


図-4 定着長さ確認試験

3. 試験結果

3.1 定着長の確認

プレテンション方式によるPC鋼材の付着性能の確認は、プレストレス導入前と直後に、PC鋼材最下段位置のコンクリート表面ひずみを、図-4に示す通り、PC桁の起点・終点の両側面を測定することにより確認した。

図-5.1に通常桁、図-5.2にPFBC灰混入桁の材齢1日強度における、桁端付近のPC鋼材定着域の、コンクリート表面のひずみ分布を示す。

図-5.1より、通常桁は桁端から600mm~800mmの範囲が理論値より高くなっているのに対し、図-5.2のPFBC灰混入桁は、徐々に理論値に近づく結果であった。定着によるひずみ分布は、道路橋示方書の定着長さ 65ϕ ($L_a = \phi 15.2 \times 65 = 988\text{mm}$) 付近で理論値に達している。

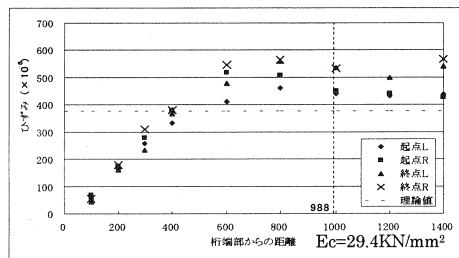


図-5.1 定着域におけるひずみ分布 (通常桁)

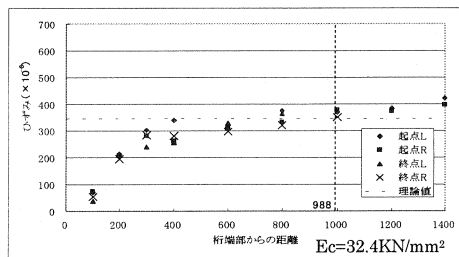


図-5.2 定着域におけるひずみ分布 (PFBC 灰桁)

3.2 静的曲げ試験結果

3.2.1 コンクリートの強度性状

表-4 は静的載荷試験供試体の載荷試験時の強度発現結果を示す。

ここで、引張強度の計算値は、コンクリート標準準方書の圧縮強度に基づく計算式によるもので、実測値の結果と同等であった。

表-4 強度試験結果

| 配合名 | 圧縮強度 (N/mm ²) | | 弾性係数 (kN/mm ²) | | 引張強度 (kN/mm ²) | |
|--------|---------------------------|------|----------------------------|------|----------------------------|------|
| | 材齢1日 | 載荷時 | 材齢1日 | 載荷時 | 実験値 | 計算値 |
| 通常桁 | 45.4 | 68.0 | 32.7 | 38.4 | 3.92 | 3.83 |
| PFBC灰桁 | 43.5 | 83.1 | 32.5 | 40.4 | 4.34 | 4.38 |

※載荷時 通常桁 (N) …材齢45日 PFBC灰桁 (P) …材齢48日

3.2.2 曲げ変形性状

表-5 は、ひび割れ発生時の計算値と実測値の荷重を示す。

図-6 は鋼材弾性域の、また図-7 は破壊に至るまでの支間中央における荷重-たわみの関係をそれぞれ示す。図-6 より、PFBC灰混入桁は通常桁と比べ、ひび割れ発生荷重、ひび割れ後の剛性何れも同等以上の性能を示しているのが認められる。

表-5 ひび割れ発生荷重

| | 計算値 (kN) | 実験値 (kN) | |
|-----------|----------|----------------|-----|
| | | コンクリート引張ひずみ変曲点 | 目視 |
| 通常桁 | 159 | 146 | 160 |
| PFBC灰混入桁A | 163 | 178 | 170 |
| PFBC灰混入桁B | 167 | 175 | 165 |

図-7 より、PFBC灰混入桁の終局時たわみは通常桁のそれより大きく、また、復元力も通常桁のそれと同等であることがわかる。PFBC灰混入桁の終局時たわみが大きい理由として、後述の終局時コンクリート圧縮ひずみが通常コンクリートのそれと同等以上であることと圧縮強度が大きいことが考えられる。

図-8 は、支間中央の桁上縁における荷重-ひずみ関係を示す。この図から、PFBC灰混入桁における終局時のひずみは 3500×10^{-6} を超え、普通桁と同等以上である。

これらの結果から、PFBC灰混入コンクリート桁の曲げ変形は通常桁と同等以上の性能を持っているといえる。写真-1 は静的曲げ載荷試験の状況である。

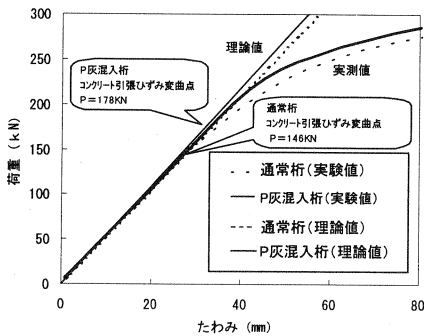


図-6 鋼材弾性域の荷重-たわみ関係

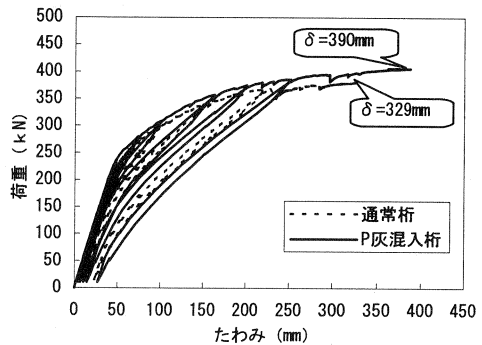


図-7 荷重-たわみ関係

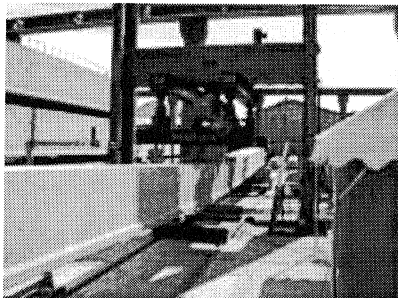


写真-1 載荷試験状況

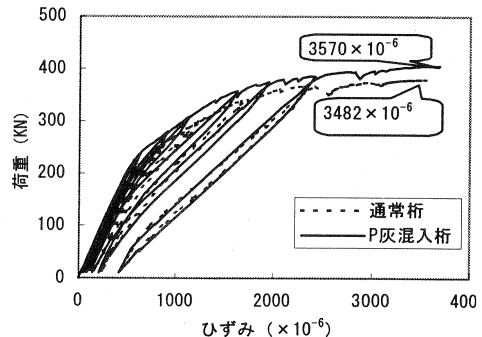


図-8 荷重-ひずみ関係

4.2.2 曲げ強度特性

表-6 に曲げ強度特性を示す。PFBC 灰混入桁の強度特性はいずれも通常桁を上回ると共に、曲げ耐力の実験値は、通常桁同様、計算値以上であった。これから曲げについては、現行の設計基準（コンクリート標準示方書、道路橋示方書）が適用できる。

表-6 曲げ載荷試験結果

| 供試体名 | ひび割れ発生モーメント | | 実験値 計算値 | 降伏モーメント | | 実験値 計算値 | 終局モーメント | | 実験値 計算値 | δ_y (mm) | δ_u (mm) | δ_u δ_y |
|----------|-------------|-----|------------|-----------|------|------------|-----------|------|------------|--------------------|--------------------|--------------------------|
| | Mcr (kN·m) | | | My (kN·m) | | | Mu (kN·m) | | | | | |
| | 実験値 | 計算値 | 実験値 | 計算値 | 実験値 | 計算値 | 実験値 | 計算値 | | | | |
| 通常桁 | 529 | 576 | 0.92 | 1204 | 1194 | 1.01 | 1375 | 1335 | 1.03 | 143 | 329 | 2.29 |
| PFBC 灰桁A | 645 | 591 | 1.09 | 1262 | 1213 | 1.04 | 1472 | 1398 | 1.05 | 147 | 391 | 2.65 |
| PFBC 灰桁B | 636 | 604 | 1.05 | 1243 | 1212 | 1.03 | 1429 | 1398 | 1.02 | 159 | 388 | 2.44 |

4.2.3 ひび割れ性状

ひび割れ性状の確認は、図-3 に示す通り、支間中央付近にパイ型変位計を取り付け、ひび割れ幅の測定を行った。ひび割れ幅の計算値は、コンクリート標準示方書のひび割れ算定式による。ここで、鋼材形状がひび割れ幅に影響する係数は $k_1=1.3$ とした。

表-7 は主桁下縁におけるコンクリート応力が圧縮域から 0 に変わる時から、最下段の鋼材応力度が 200N/mm^2 増加した時の最下段鋼材位置におけるひび割れ幅およびひび割れ間隔を示す。この結果、最大ひび割れ幅の計算値と実測値はほぼ等しかった。平均ひび割れ間隔の実測値をみると、通常桁は 214mm 、PFBC 灰混入桁は 250mm であり、PFBC 灰混入桁は、ひび割れ間隔が広い一方、ひび割れ幅は通常桁と同等となった。

図-9 に終局直前における等曲げ区間のひび割れ分布性状を示す。

表-7 ひび割れ間隔と幅の関係

| 配合名 | 実験値 | | 計算値 | 実験値 計算値 | 実測値 |
|-----------|--------------|--------------|--------------|------------|---------------|
| | 平均ひび割れ幅 (mm) | 最大ひび割れ幅 (mm) | 最大ひび割れ幅 (mm) | | 平均ひび割れ間隔 (mm) |
| 通常桁 | 0.23 | 0.32 | 0.30 | 1.07 | 214 |
| PFBC 灰桁 A | 0.24 | 0.28 | 0.29 | 0.96 | 250 |
| PFBC 灰桁 B | 0.24 | 0.31 | 0.29 | 1.07 | 250 |

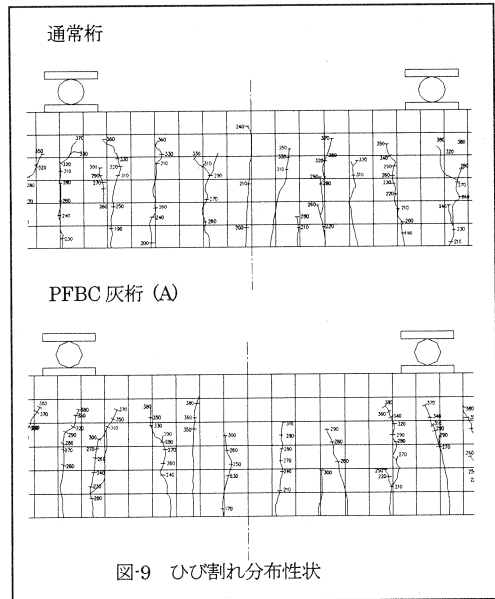


図-9 ひび割れ分布性状

4. おわりに

本研究では早強セメントの 30%をPFBC 灰に置換し、プレテンション方式のPC 桁の適用性について検討を行った結果、曲げ特性およびひび割れ特性は通常桁と同等以上の性能を示した。また、定着性能については通常桁より若干性能が劣る傾向が見られるものの道路橋示方書の規格値は満足した。これらから実用化できる可能性は高いと考えられる。しかし、施工上では、PFBC 灰混入コンクリートはフレッシュコンクリートの粘性が高くなる性質を持っており、作業性を考慮したワーカビリティの改善を行ったが、今後更に高強度のコンクリートを使用する場合は、フローによる管理方法の採用が必要である。

現在、収縮やクリープ、プレストレスの応力損失およびせん断耐力について検討している。PFBC 灰混入コンクリートのプレストレスの応力損失が小さい傾向があり、これらの成果については、今後発表する予定である。

最後に、本実験は産業廃棄物有効活用によるPC 桁研究委員会の活動の一環として行ったものであり、関係各位にお礼を申し上げる。